

ТЕРМОХВИЛЬОВА ДІАГНОСТИКА ОПТИЧНО НЕПРОЗОРИХ СТРУКТУР

Віктор СЛЮСАРЕНКО

(магістрант кафедри фізики та методики її викладання)

Науковий керівник - канд. фіз. – мат. наук, доцент О.В. Волчанський

У зв'язку із бурхливим розвитком мікроелектроніки все більш актуальними стають пошуки ефективних методів безруйнівного контролю багатoshарових напівпровідникових структур. У цьому плані увагу спеціалістів все більше привертає фотоакустичний (ФА) ефект [1-3].

Традиційні методи дефектоскопії, такі як оптична, рентгенівська й електронна мікроскопія, мають певні обмеження. Наприклад, оптичні й електронні мікроскопи малоприматні для дослідження внутрішньої структури сильнопоглинаючих матеріалів; використання ж рентгенівського мікроскопа пов'язано з тривалою розшифровкою отриманих зображень. Крім того, усім названим типам мікроскопів властивий один спільний недолік – неможливість реєстрації об'ємного розподілу теплових неоднорідностей зразків.

ФА ефект безпосередньо зв'язаний з оптичними, тепловими й механічними властивостями об'єкта, геометричною структурою, і т.д. Тому поверхневі і підповерхневі особливості зразка можуть бути досліджені при реєстрації ФА сигналу. До того ж ФА (термохвильова) мікроскопія має унікальну здатність для неруйнівного "пошарового" діагностичного контролю структури зразка. ФА ефект також можна широко застосовувати в спектральних дослідженнях як високопрозорих, так і непрозорих або сильно розсіювальних матеріалів.

ФА ефект виникає, коли об'єкт опромінюється модульованим у часі потоком енергії. В результаті виникають періодичні коливання температури – теплові хвилі, а за рахунок теплового розширення – акустичні хвилі.

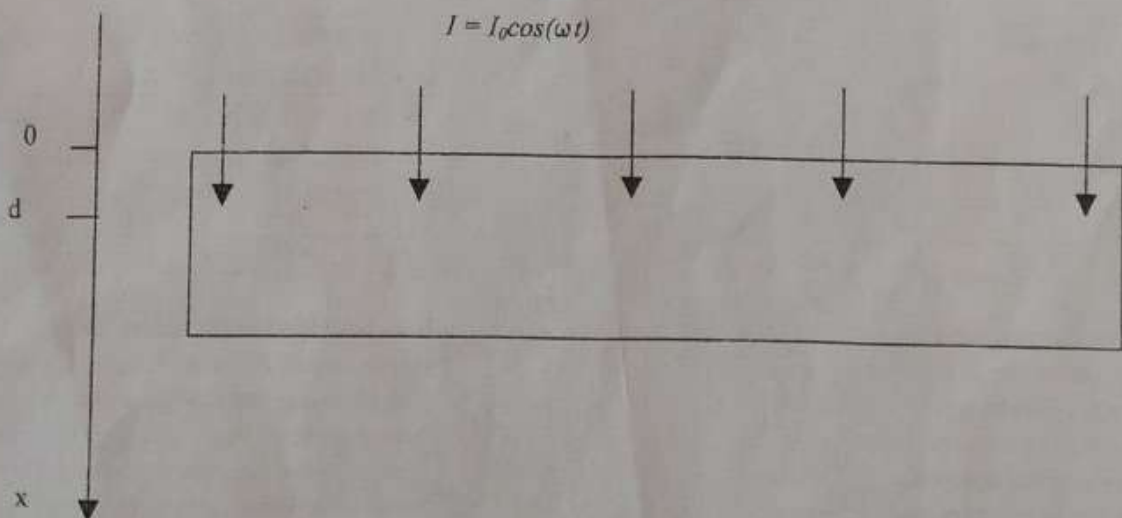
Щоб отримати якісне уявлення про виникнення і властивості теплових хвиль в конденсованому середовищі, розглянемо наступну найпростішу одновимірну модель. Нехай пластина ізотропного твердого тіла товщиною d (мал.1) рівномірно освітлюється в площині $x=0$ світлом, модульованим за інтенсивністю по закону:

$$I = I_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

Для спрощення розрахунків розв'яжемо задачу в комплексному вигляді. Припустивши, що вся поглинута світлова енергія перетворюється в теплову, можемо записати рівняння теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{I_0}{2} e^{-\alpha x} e^{i\omega t}, \quad (2)$$

де c , ρ , χ і α – питомі теплоємність і густина, теплопровідність і коефіцієнт оптичного поглинання матеріалу, T – модульована температура зразка.



Мал.1.

Розв'язок однорідного рівняння

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

шукаємо у вигляді

$$T_{\text{одн}}(x,t) = Ae^{\eta t} e^{i\omega x} \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (3) отримуємо:

$$\eta = (1+i)(\omega c\rho/2\chi)^{1/2} = \frac{(1+i)}{l}, \text{ де } l = (2\chi/\omega c\rho)^{1/2} - \text{довжина теплової дифузії.}$$

З врахуванням неоднорідного доданку та відкинувши із фізичних міркувань доданок із зростаючою вглиб зразка температурою, отримуємо розв'язок рівняння (2) у вигляді:

$$T(x,t) = A_1 e^{-\alpha x} e^{i\omega t} + A_2 e^{-x/l} e^{i(\omega t - x/l)} \quad (5)$$

де

$$A_1 = \frac{\alpha I_0}{2\chi(\eta^2 - \alpha^2)} \quad (6)$$

Враховуючи, що теплопровідність повітря набагато менше теплопровідності твердого тіла, запишемо граничну умову:

$$\chi \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (7)$$

Підставивши (5) в (7), отримаємо:

$$A_2 = -\frac{\alpha}{\eta} A_1, \quad (8)$$

Таким чином вираз для комплексної температури на глибині x :

$$T(x,t) = \frac{\alpha I_0}{2\chi(\eta^2 - \alpha^2)} \left(e^{-\alpha x} e^{i\omega t} - \frac{\alpha}{\eta} e^{-x/l} e^{i(\omega t - x/l)} \right) \quad (9)$$

Перший доданок описує коливання температури, зумовлені поглинанням світла в даній точці, а другий відповідає теплу, що надійшло від інших областей середовища і описує власне теплову хвилю. Видно: довжина теплової дифузії $l = (2\chi/\omega c\rho)^{1/2}$ відповідає глибині затухання хвилі в e разів. Із рівняння поверхні рівної фази $\phi = \omega t - x/l$ можна отримати, що швидкість хвильового фронту: $v = \omega l = (2\omega\chi/c\rho)^{1/2}$. Довжина хвилі $\lambda = vT = 2\pi l$. Видно, що теплова хвиля затухає на своїй довжині в $e^{2\pi} \approx 500$ разів.

Таким чином, теплові хвилі мають принципову відмінність від акустичних та електромагнітних хвиль: вони є сильно затухаючими, причому глибина затухання залежить від частоти модуляції падаючого на тіло випромінювання. Для твердих тіл глибина затухання теплових хвиль сягає від 1 мм для частот порядку 10 Гц до 1 мкм для частот порядку 10 МГц. Відповідні величини для алюмінію, кремнію та германію наведені в табл. 1.

Табл. 1.

Матеріал	Густина, г/см ³	Питома теплоємність, кал/г·К	Теплопровідність, кал/м·с·К	довжина теплової дифузії $l = (2\chi/\omega c\rho)^{1/2}$, мкм на різних частотах модуляції ($\nu = \omega/2\pi$)				
				$\nu=10$ Гц	$\nu=10^2$ Гц	$\nu=10^3$ Гц	$\nu=10^4$ Гц	$\nu=10^5$ Гц
Al	2,7	0,216	0,48	1870	590	187	59	18,7
Si	2,33	0,168	0,45	1900	610	190	61	19,0
Ge	5,32	0,167	0,167	3670	1160	367	116	36,7

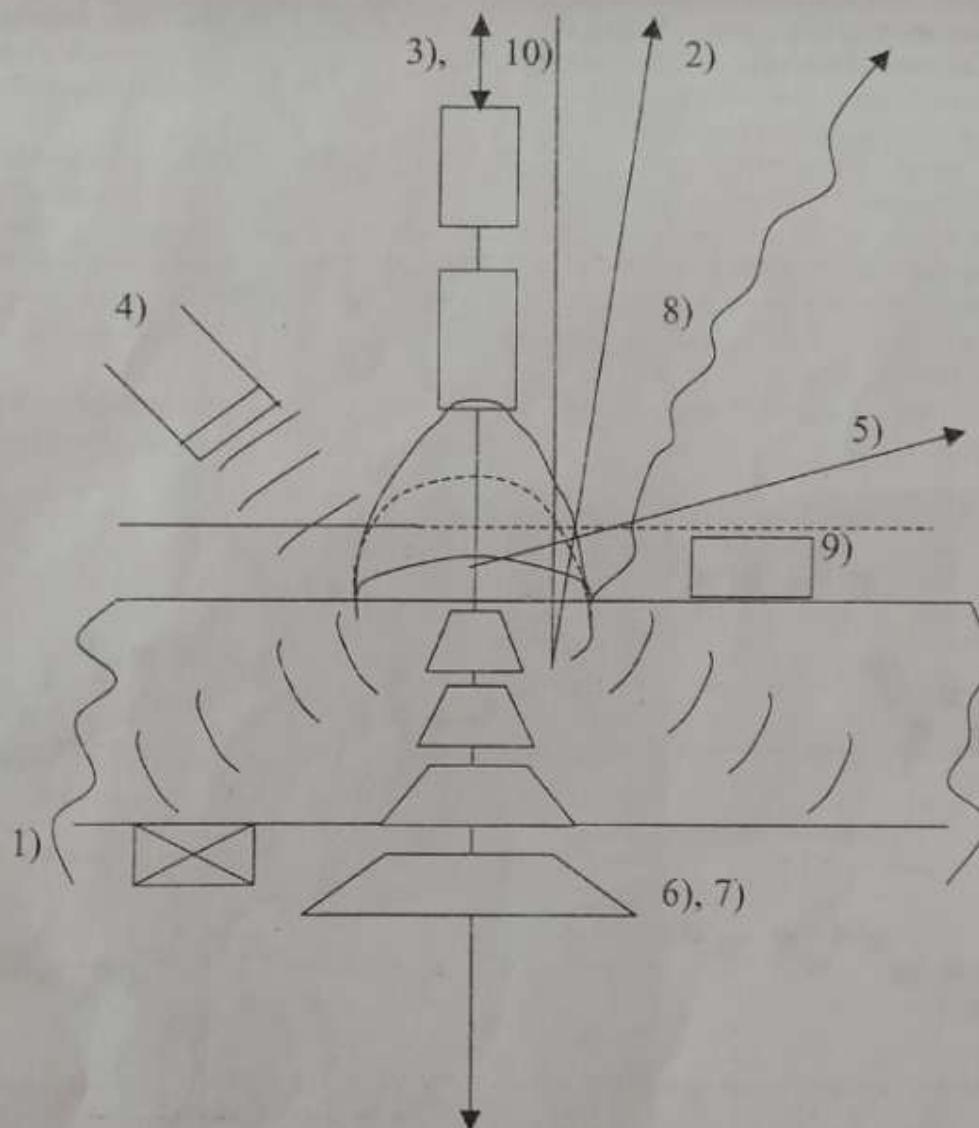
Сильне затухання робить практично неможливим безпосередню реєстрацію теплових хвиль (наприклад проелектричними датчиками), що ставить, на перший погляд, велику перепону для їх застосування. Однак, існує досить багато методів [4,5], які дозволяють фіксувати об'ємний розподіл нестационарних теплових полів за рахунок супутних фізичних явищ. Перша група методів зв'язана з детектуванням пружних змішень, що виникають безпосередньо в зразку за рахунок теплового розширення, – прямі методи ФА реєстрації. В другу групу методів входять детектування явищ, що виникають при розповсюдженні в тілі теплових хвиль і не пов'язаних з тепловими розширеннями зразка – це фототермічні (ФТ) методи реєстрації.

На мал.2. наведена зведена схема, що зображає механізм детектування ФА і ФТ сигналів. Із методів прямої реєстрації акустичного сигналу можна назвати:

- 1)- реєстрація акустичного зміщення поверхні зразка п'єзоелектричним перетворювачем, що знаходиться з ним в безпосередньому контакті;
- 2)- реєстрація відбивання пробного променя при деформації поверхні зразка;
- 3)- інтерференційний метод, що реєструє зміну різниці ходу відбитого пробного променя при зміщенні поверхні зразка.

Значно більш широкий ряд фототермічних методів реєстрування:

- 4)- газомікрофонний метод – мікрофон реєструє акустичні хвилі, що виникають при тепловому розширенні шару газу, що прилягає до зразка;



- | | |
|---|---|
| 1)- метод п'єзодагчика; | 6)- метод термолінзи; |
| 2)- метод реєстрації кута фотовідбивання; | 7)- метод рефракційної інтерферометрії; |
| 3)- інтерференційний метод; | 8)- метод фототермічної радіометрії |
| 4)- газомікрофонний метод; | 9)- контактне вимірювання температури; |
| 5)- метод ефекту міражу | 10)- метод фотовідбивання. |

Мал.2.

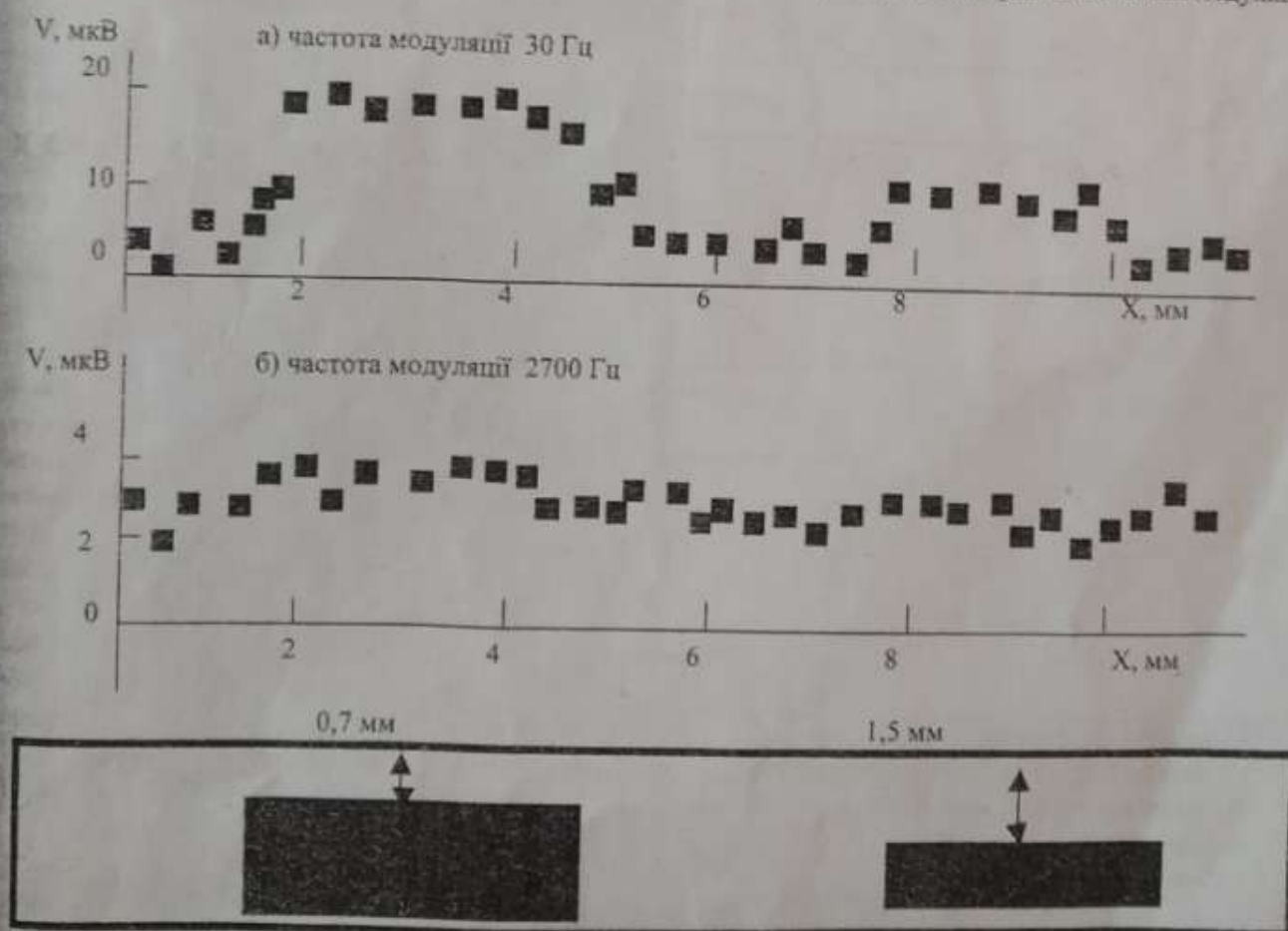
5)- метод ефекту міражу (так зв. фотодифлекційний метод [4]) – детектування відхилення пробного променя при проходженні його через область з градієнтом показника заломлення, що викликаний модульованим нагрівом зразка;

- 6)- метод термолінзи – термоіндукований градієнт показника заломлення викликає розфокусовку пробного променя, що проходить через область змінного нагріву;
- 7)- рефракційна інтерферометрія - інтерферометром реєструють фазову затримку пробного променя при його проходженні скрізь область з градієнтом показника заломлення;
- 8)- метод фототемічної радіометрії – реєстрація нерівноважного теплового випромінювання зразка, викликаним модульованою зміною його температури;
- 9)- контактні методи вимірювання модульованої температури поверхні зразка (піродатчики, термопари, термістора, болометри і т.д.);
- 10)- реєстрування з допомогою пробного променя показника відбивання показника при нагріванні.

Найбільш поширеним на даний момент є п'єзоелектричний метод реєстрування ФА сигналу завдяки високій чутливості при відносній простоті експериментальної реалізації. Слід зазначити, що, оскільки в звуковому діапазоні акустичні хвилі на декілька порядків довші за теплові і за характерні розміри структурних елементів мікросхем (десятки – сотні мкм), вони в даному випадку слугують лише пасивними носіями інформації, отриманої від розсіяння теплових хвиль на областях з неоднорідним розподілом теплоємності, густини і теплопровідності.

Особливий інтерес представляє термохвильова ФА мікроскопія своєю унікальною властивістю підповерхневої візуалізації теплової структури оптично непрозорих об'єктів [1-3, 6]. Візуалізація обумовлена розсіянням теплових хвиль на областях з варіаціями густини, теплоємності і теплопровідності. Використовуючи приведену раніше залежність довжини теплової хвилі від частоти модуляції світла, можна, варіюючи частоту, здійснювати пошарову візуалізацію теплових неоднорідностей оптично непрозорих об'єктів. Глибину шару можна змінювати від одиниць мм на частотах ≈ 10 Гц до одиниць мкм на частотах ≈ 10 МГц (див. табл.1).

Як приклад на Мал. 3 наведені отримані нами за допомогою п'єзоелектричного методу ФА топограми алюмінієвого зразка (прямокутна пластинка 14×14 мм² товщиною 2,3 мм) на двох різних частотах модуляції.



Мал. 3.

В пластині було створено механічні дефекти – висвердлені отвори діаметром 3,6 мм різної глибини, як показано на умовному розрізі зразка в поясненні до малюнку (пустоти показані темним кольором).

Із топограми, знятої на частоті 30 Гц (Мал. 3 (а)) видно, що ФА сигнал зростає там, де лазерний промінь зондує області з погіршеними умовами відводу тепла (підповерхнева порожнеча). Розраховане значення довжини теплової дифузії на даній частоті $l \approx 1,15$ мм. Амплітуда сигналу від області з дефектом 1 (глибина залягання 0,7 мм) приблизно в 2,5 рази більша, ніж від бездефектної області, а для області з дефектом 2 (глибина залягання 1,5 мм) – приблизно в 1,7 рази більша, ніж бездефектної.

ФА топограма, знята на частоті 2700 Гц для того ж зразка наведена на Мал.3 (б). В цьому випадку довжина теплової хвилі, а значить і глибина її проникнення менше від глибини залягання дефектів, а значить "тепловий зонд" не досягає дефектної області і "не відчуває" ніяких порушень структури зразка. З малюнку видно, що сигнал від всіх областей практично однаковий ($l \approx 1,15$ мм).

Таким чином, упевнюємося, що візуалізація дефектів відбувається за рахунок теплових хвиль (так і повинно бути, оскільки довжина генерованих акустичних хвиль на декілька порядків перевищує розміри самого зразка й вони на дефектах не резонуються).

БІБЛІОГРАФІЯ

- 1 Busse 1985 – G.Busse Imaging with Optically Generated thermal Waves // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. – 1985. – Vol.SU-32, №2. – P.355-364.
- 2 Rosenwaig A. Thermal wave microscopy with photoacoustics // J.Appl.Phys. – 1980. – Vol.51, №4. – P.2210-2211.
- 3 Shu-yi Zhang and Li Chen Photoacoustic Microscopy (PAM) and detection of surface features of semiconductor devices // in Photoacoustic and Thermal wave phenomena in semiconductors (ed. by A.Mandelis) New York.: Elsevier Science Publ. – 1987. – P.29-51.
- 4 Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. – М., Наука, 1991.
- 5 Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия– М.: Наука, 1975. – 320 с.
- 6 Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. Неразрушающий контроль дефектов структуры графитопоксидных композитов лазерным ультразвуковым методом. // Механика композитных материалов, 2000, т.36, №6, с.831-838.

ЗАСОБИ АНАЛІЗУ ДАНИХ НА ПЕРСОНАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРАХ

Наталія СУШКЕТА

(студентка V курсу фізико-математичного факультету)

Науковий керівник – доктор фіз.-мат. наук, професор О.В Авраменко

Актуальність теми. Для успішного і прибуткового функціонування будь-якої організації в умовах ринку і жорсткої конкуренції звичайно, необхідний ретельний аналіз інформації про створення продукції, її збут, експлуатацію, а також аналіз інформації про конкурентів з метою отримання надійних і обґрунтованих висновків. Тому потреба в засобах статистичного аналізу даних в наш час дуже велика, це і стало причиною для розвитку ринку статистичних програм, якому пропонують більше тисячі програм [2].

Метою роботи є порівняльний аналіз статистичних пакетів загального призначення за функціональним наповненням, структурними і організаційними можливостями.

Особливості статистичних пакетів. На вітчизняному ринку статистичних пакетів в даний час популярними є так звані пакети загального призначення (універсальні). Широкий діапазон статистичних методів, відсутність прямої орієнтації на специфічну предметну область, дружелюбний інтерфейс користувача приваблює в них не тільки починаючих користувачів, але і спеціалістів. До них відносять такі популярні універсальні пакети - STADIA, SPSS, STATGRAPHICS, STATISTICA, SYSTAT та ін. - орієнтовані на широку аудиторію

Для того, щоб статистичний пакет був ефективним і зручним у роботі, до нього ставляться такі вимоги: наявність достатнього набору статистичних методів; можливість введення і контролю правильності введення даних; можливості управління, зокрема й обміну з поширеними БД; можливості редагування, виводу у зручній формі та зберігання результатів; наявність графічного блоку; можливості друкувати результати у вигляді звіту; простота у роботі та вивченні.

Короткий характеристика окремих статистичних пакетів. В статті розглянуто такі статистичні пакети загального призначення: STADIA, SPSS, STATISTICA, STATGRAPHICS, SYSTAT, SAS.